

(1) 特許出願公開番号

特開2002-210681

(P2002-210681A)

(43)公開日 平成14年7月30日(2002.7.30)

(51) Int.CL'

識別記号

F I

テート・ロード* (参考)

B 2 5 J 6/00

B 2 5 J 6/00

F 3C007

調査請求 未請求 請求項の数30 O.L (全 21 頁)

(21) 出願番号 特願2001-350855(P2001-350855)

(22) 出願日 平成13年11月15日(2001. 11. 15)

(31) 优先权主张番号 特許2000-353249(P2000-353249)

(32) 領先日 平成12年11月20日(2000.11.20)

(33) 優先權主張国 日本 (JP)

(71)出願人 000002185

ソニー株式会社

東京都品川区北品川6丁目7番35号

(71)出願人 599133381

山口 仁一

東京都日野市多摩平5-14-38

(72) 発明者 黒木 義博

京都品川区北品川6丁目7番35号 ソニ
一株式会社内

(74) 代理人 100101801

弁理士 山田 英治 (外2名)

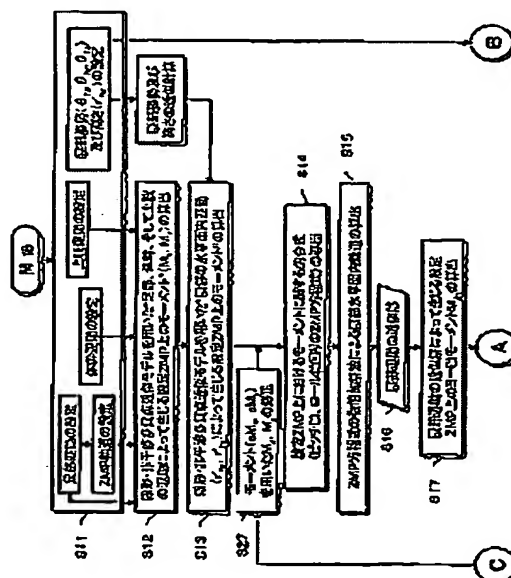
最終頁に続く

(54)【発明の名称】 脚式移動ロボットのための動作制御装置及び動作制御方法、並びにロボット装置

(57)【要約】

【課題】 歩行などの脚式作業時に機体に印加されるロール、ピッチ、ヨー各軸のモーメントの影響をキャンセルしながら正確に駆動する。

【解決手段】 まず、設定された上肢、体幹部、下肢の運動によって生じる設定ZMP上におけるロボットの機体が発生するピッチ軸及び／又はロール軸モーメントを算出して、ピッチ軸及び／又はロール軸モーメントを打ち消す下肢、体幹部の運動を求める。次いで、算出された下肢、体幹部の運動によって生じる設定ZMP上における機体が発生するヨー軸モーメントを算出して、ヨー軸モーメントを打ち消す上肢運動を求める。



【特許請求の範囲】

【請求項1】少なくとも上肢と体幹部と下肢で構成され、下肢による脚式移動を行うタイプのロボットの動作制御装置であって、

少なくとも上肢、体幹、下肢のいずれかについての運動を設定する手段と、

該設定された上肢、体幹部、下肢の運動によって生じる設定ZMP上における前記脚式移動ロボットの機体のヨー軸モーメントを算出する手段と、

該ヨー軸モーメントを打ち消す上肢運動を算出する手段と、

該算出された上肢運動に従って、該設定された上肢、体幹、下肢の運動を修正する手段と、を具備することを特徴とする脚式移動ロボットのための動作制御装置。

【請求項2】前記の上肢は、肩関節及び肘関節にそれぞれ1以上の回転自由度を有し、

前記のヨー軸モーメントを打ち消す上肢運動は、該肩関節及び／又は肘関節の駆動を利用した運動である、ことを特徴とする請求項1に記載の脚式移動ロボットのための動作制御装置。

【請求項3】少なくとも上肢と体幹部と下肢で構成され、下肢による脚式移動を行うタイプのロボットの動作制御装置であって、

少なくとも上肢、体幹、下肢のいずれかについての運動を設定する手段と、

該設定された上肢、体幹部、下肢の運動によって生じる設定ZMP上における前記脚式移動ロボットの機体のピッチ軸及び／又はロール軸モーメントを算出する手段と、

該ピッチ軸及び／又はロール軸モーメントを打ち消す下肢、体幹部の運動を算出する手段と、

該算出された下肢、体幹部の運動によって生じる設定ZMP上における前記脚式移動ロボットの機体のヨー軸モーメントを算出する手段と、

該ヨー軸モーメントを打ち消す上肢運動を算出する手段と、

該算出された上肢、体幹部、下肢の運動に従って、該設定された上肢、体幹、下肢の運動を修正する手段と、を具備することを特徴とする脚式移動ロボットのための動作制御装置。

【請求項4】前記の上肢は、肩関節及び肘関節にそれぞれ1以上の回転自由度を有し、

前記のヨー軸モーメントを打ち消す上肢運動は、該肩関節及び／又は肘関節の駆動を利用した運動である、ことを特徴とする請求項3に記載の脚式移動ロボットのための動作制御装置。

【請求項5】少なくとも上肢と体幹部と下肢で構成され、下肢による脚式移動を行うタイプのロボットの動作制御装置であって、(a)要求された動作を再現するための少なくとも足部運動、体幹運動、上肢運動、腰部の

姿勢及び高さのうちいずれかを設定する手段と、(b)前記手段(a)により設定された足部運動に基づいてZMP軌道を設定する手段と、(c)前記手段(a)により設定された足部、体幹、上肢の運動によって前記手段(b)により設定されたZMP上で生じる前記脚式移動ロボットのピッチ軸及びロール軸回りのモーメントを算出する手段と、(d)前記手段(c)により算出されたピッチ軸及びロール軸回りのモーメントを打ち消す腰部運動の解を求める手段と、(e)前記手段(d)により求められた腰部運動によって前記手段(b)により設定されたZMP上で前記脚式移動ロボットのヨー軸回りに生じるモーメントを算出する手段と、(f)前記手段(e)により算出されたヨー軸回りのモーメントを打ち消す上肢運動の解を求める手段と、(g)前記手段(d)及び前記手段(f)により求められた腰部運動及び上肢運動に基づいて前記脚式移動ロボットの全身運動を導出する手段と、を具備することを特徴とする脚式移動ロボットのための動作制御装置。

【請求項6】少なくとも上肢と体幹部と下肢で構成され、下肢による脚式移動を行うタイプのロボットの動作制御装置であって、(A)要求された動作を再現するための少なくとも足部運動、体幹運動、上肢運動、腰部の姿勢及び高さのうちいずれかを設定する手段と、(B)前記手段(A)により設定された足部運動に基づいてZMP軌道を設定する手段と、(C)前記脚式移動ロボットの非厳密モデルを用いて、前記手段(A)により設定された足部、体幹、上肢の運動によって前記手段(B)により設定されたZMP上で生じる前記脚式移動ロボットのピッチ軸及びロール軸回りのモーメントを算出する手段と、(D)前記手段(C)により算出されたピッチ軸及びロール軸回りのモーメントを打ち消す腰部運動の近似解を求める手段と、(E)前記脚式移動ロボットの非厳密モデルを用いて、前記手段(D)により求められた腰部運動の近似解によって前記手段(B)により設定されたZMP上で前記脚式移動ロボットのヨー軸回りに生じるモーメントを算出する手段と、(F)前記手段(E)により算出されたヨー軸回りのモーメントを打ち消す上肢運動の近似解を求める手段と、(G)前記脚式移動ロボットの厳密モデルを用いて、前記手段(D)及び前記手段(F)により算出された全身運動実行時における前記手段(B)により設定されたZMP上で生じる前記脚式移動ロボットのピッチ軸、ロール軸、及びヨー軸回りのモーメントを算出する手段と、(H)前記手段(G)により算出されたピッチ軸、ロール軸、及びヨー軸回りのモーメントが所定の許容値未満であれば全身運動の解とする手段と、(I)前記手段(G)により算出されたピッチ軸、ロール軸、及びヨー軸回りのモーメントが所定の許容値以上であれば、設定ZMP上における非厳密モデルのモーメントを修正して、前記手段(D)又は前記手段(F)に再投入する手段と、を具備するこ

とを特徴とする脚式移動ロボットのための動作制御装置。

【請求項7】前記非厳密モデルは前記脚式移動ロボットに関する線形及び／又は非干渉の多質点近似モデルであり、

前記厳密モデルは前記ロボットに関する剛体モデル、又は、非線形及び／又は干渉の多質点近似モデルである、ことを特徴とする請求項6に記載の脚式移動ロボットのための動作制御装置。

【請求項8】さらに、

(F') 腰部運動の近似解を求める前記手段(D)及び／又は上肢運動の近似解を求める前記手段(F)において求めた近似解ではあらかじめ設定した体幹・上肢運動が実現できない場合に、体幹・上肢運動パターンを再設定・修正を行う手段、を備えることを特徴とする請求項6に記載の脚式移動ロボットのための動作制御装置。

【請求項9】前記の腰部運動の近似解を求める手段(D)は、足部運動、体幹運動、上肢運動によって生じる設定ZMP上のモーメントと、腰部の水平面内運動によって生じる設定ZMP上のモーメントとの釣合方程式を解くことによって腰部運動の近似解を求める、ことを特徴とする請求項6に記載の脚式移動ロボットのための動作制御装置。

【請求項10】前記の腰部運動の近似解を求める手段(D)は、時間の関数を周波数の関数に置き換えて計算する、ことを特徴とする請求項6に記載の脚式移動ロボットのための動作制御装置。

【請求項11】前記の腰部運動の近似解を求める手段(D)は、足部運動、体幹運動、上肢運動によって生じる設定ZMP上のモーメントにフーリエ級数展開を適用するとともに、腰部の水平面内運動にフーリエ級数展開を適用して、腰部水平面内軌道のフーリエ係数を算出して、さらに逆フーリエ級数展開を適用することによって腰部運動の近似解を求める、ことを特徴とする請求項6に記載の脚式移動ロボットのための動作制御装置。

【請求項12】前記の上肢運動の近似解を求める手段(F)は、足部運動、体幹運動によって生じる設定ZMP上のモーメントの釣合方程式を解くことによって上肢運動の近似解を求める、ことを特徴とする請求項6に記載の脚式移動ロボットのための動作制御装置。

【請求項13】前記の上肢運動の近似解を求める手段(F)は、時間の関数を周波数の関数に置き換えて計算する、ことを特徴とする請求項6に記載の脚式移動ロボットのための動作制御装置。

【請求項14】前記の上肢運動の近似解を求める手段(F)は、足部運動、体幹運動によって生じる設定ZMP上のモーメントにフーリエ級数展開を適用してフーリエ係数を算出して、さらに逆フーリエ級数展開を適用することによって上肢運動の近似解を求める、ことを特徴とする請求項6に記載の脚式移動ロボットのための動作

制御装置。

【請求項15】少なくとも上肢と体幹部と下肢で構成され、下肢による脚式移動を行うタイプのロボットの動作制御方法であって、

少なくとも上肢、体幹、下肢のいずれかについての運動を設定するステップと、

該設定された上肢、体幹部、下肢の運動によって生じる設定ZMP上における前記脚式移動ロボットの機体のヨー軸モーメントを算出するステップと、

10 該ヨー軸モーメントを打ち消す上肢運動を算出するステップと、

該算出された上肢運動に従って、該設定された上肢、体幹、下肢の運動を修正するステップと、を具備することを特徴とする脚式移動ロボットのための動作制御方法。

【請求項16】前記の上肢は、肩関節及び肘関節にそれぞれ1以上の回転自由度を有し、

前記のヨー軸モーメントを打ち消す上肢運動は、該肩関節及び／又は肘関節の駆動を利用した運動である、ことを特徴とする請求項15に記載の脚式移動ロボットのための動作制御方法。

【請求項17】少なくとも上肢と体幹部と下肢で構成され、下肢による脚式移動を行うタイプのロボットの動作制御方法であって、

少なくとも上肢、体幹、下肢のいずれかについての運動を設定するステップと、

該設定された上肢、体幹部、下肢の運動によって生じる設定ZMP上における前記脚式移動ロボットの機体のピッチ軸及び／又はロール軸モーメントを算出するステップと、

30 該ピッチ軸及び／又はロール軸モーメントを打ち消す下肢、体幹部の運動を算出するステップと、

該算出された下肢、体幹部の運動によって生じる設定ZMP上における前記脚式移動ロボットの機体のヨー軸モーメントを算出するステップと、

該ヨー軸モーメントを打ち消す上肢運動を算出するステップと、

該算出された上肢、体幹部、下肢の運動に従って、該設定された上肢、体幹、下肢の運動を修正するステップと、を具備することを特徴とする脚式移動ロボットのための動作制御方法。

40 【請求項18】前記の上肢は、肩関節及び肘関節にそれぞれ1以上の回転自由度を有し、

前記のヨー軸モーメントを打ち消す上肢運動は、該肩関節及び／又は肘関節の駆動を利用した運動である、ことを特徴とする請求項17に記載の脚式移動ロボットのための動作制御方法。

【請求項19】少なくとも上肢と体幹部と下肢で構成され、下肢による脚式移動を行うタイプのロボットの動作制御方法であって、(a)要求された動作を実現するための少なくとも足部運動、体幹運動、上肢運動、腰部の

姿勢及び高さのうちいずれかを設定するステップと、
 (b) 前記ステップ(a)により設定された足部運動に基づいてZMP軌道を設定するステップと、(c) 前記ステップ(a)により設定された足部、体幹、上肢の運動によって前記ステップ(b)により設定されたZMP上で生じる前記脚式移動ロボットのピッチ軸及びロール軸回りのモーメントを算出するステップと、(d) 前記ステップ(c)により算出されたピッチ軸及びロール軸回りのモーメントを打ち消す腰部運動の解を求めるステップと、(e) 前記ステップ(d)により求められた腰部運動によって前記ステップ(b)により設定されたZMP上で前記脚式移動ロボットのヨー軸回りに生じるモーメントを算出するステップと、(f) 前記ステップ(e)により算出されたヨー軸回りのモーメントを打ち消す上肢運動の解を求めるステップと、(g) 前記ステップ(d)及び前記ステップ(f)により求められた腰部運動及び上肢運動に基づいて前記脚式移動ロボットの全身運動を導出するステップと、を具備することを特徴とする脚式移動ロボットのための動作制御方法。
 【請求項20】少なくとも上肢と体幹部と下肢で構成され、下肢による脚式移動を行うタイプのロボットの動作制御方法であって、(A) 要求された動作を実現するための少なくとも足部運動、体幹運動、上肢運動、腰部の姿勢及び高さのうちいずれかを設定するステップと、(B) 前記ステップ(A)により設定された足部運動に基づいてZMP軌道を設定するステップと、(C) 前記脚式移動ロボットの非厳密モデルを用いて、前記ステップ(A)により設定された足部、体幹、上肢の運動によって前記手段(B)により設定されたZMP上で生じる前記脚式移動ロボットのピッチ軸及びロール軸回りのモーメントを算出するステップと、(D) 前記ステップ(C)により算出されたピッチ軸及びロール軸回りのモーメントを打ち消す腰部運動の近似解を求めるステップと、(E) 前記脚式移動ロボットの非厳密モデルを用いて、前記ステップ(D)により求められた腰部運動の近似解によって前記ステップ(B)により設定されたZMP上で前記脚式移動ロボットのヨー軸回りに生じるモーメントを算出するステップと、(F) 前記ステップ(E)により算出されたヨー軸回りのモーメントを打ち消す上肢運動の近似解を求めるステップと、(G) 前記脚式移動ロボットの厳密モデルを用いて、前記ステップ(D)及び前記ステップ(F)により算出された全身運動実行時における前記ステップ(B)により設定されたZMP上で生じる前記脚式移動ロボットのピッチ軸、ロール軸、及びヨー軸回りのモーメントを算出するステップと、(H) 前記ステップ(G)により算出されたピッチ軸、ロール軸、及びヨー軸回りのモーメントが所定の許容値未満であれば全身運動の解とするステップと、(I) 前記ステップ(G)により算出されたピッチ軸、ロール軸、及びヨー軸回りのモーメントが所定の許容値

以上であれば、設定ZMP上における非厳密モデルのモーメントを修正して、前記ステップ(D)又は前記ステップ(F)に再投入するステップと、を具備することを特徴とする脚式移動ロボットのための動作制御方法。

【請求項21】前記非厳密モデルは前記脚式移動ロボットに関する線形及び/又は非干渉の多質点近似モデルであり、

前記厳密モデルは前記ロボットに関する剛体モデル、又は、非線形及び/又は干渉の多質点近似モデルである、ことを特徴とする請求項20に記載の脚式移動ロボットのための動作制御方法。

【請求項22】さらに、

(F') 腰部運動の近似解を求める前記ステップ(D)及び/又は上肢運動の近似解を求める前記ステップ(F)において求めた近似解ではあらかじめ設定した体幹・上肢運動が実現できない場合に、体幹・上肢運動パターンの再設定・修正を行うステップ、を備えることを特徴とする請求項20に記載の脚式移動ロボットのための動作制御方法。

20 【請求項23】前記の腰部運動の近似解を求めるステップ(D)では、足部運動、体幹運動、上肢運動によって生じる設定ZMP上のモーメントと、腰部の水平面内運動によって生じる設定ZMP上のモーメントとの釣合方程式を解くことによって腰部運動の近似解を求める、ことを特徴とする請求項20に記載の脚式移動ロボットのための動作制御方法。

【請求項24】前記の腰部運動の近似解を求めるステップ(D)では、時間の関数を周波数の関数に置き換えて計算する、ことを特徴とする請求項20に記載の脚式移動ロボットのための動作制御方法。

30 【請求項25】前記の腰部運動の近似解を求めるステップ(D)では、足部運動、体幹運動、上肢運動によって生じる設定ZMP上のモーメントにフーリエ級数展開を適用するとともに、腰部の水平面内運動にフーリエ級数展開を適用して、腰部水平面内軌道のフーリエ係数を算出して、さらに逆フーリエ級数展開を適用することによって腰部運動の近似解を求める、ことを特徴とする請求項20に記載の脚式移動ロボットのための動作制御方法。

40 【請求項26】前記の上肢運動の近似解を求めるステップ(F)では、足部運動、体幹運動によって生じる設定ZMP上のモーメントの釣合方程式を解くことによって上肢運動の近似解を求める、ことを特徴とする請求項20に記載の脚式移動ロボットのための動作制御方法。

【請求項27】前記の上肢運動の近似解を求めるステップ(F)では、時間の関数を周波数の関数に置き換えて計算する、ことを特徴とする請求項20に記載の脚式移動ロボットのための動作制御方法。

【請求項28】前記の上肢運動の近似解を求めるステップ(F)では、足部運動、体幹運動によって生じる設定

ZMP上のモーメントにフーリエ級数展開を適用してフーリエ係数を算出して、さらに逆フーリエ級数展開を適用することによって上肢運動の近似解を求める。ことを特徴とする請求項20に記載の脚式移動ロボットのための動作制御方法。

【請求項29】少なくとも上肢と体幹部と下肢で構成され、下肢による脚式移動を行うロボット装置において、前記ロボットの運動パターンを設定する運動パターン設定手段と、

該設定された運動パターンにより生じる設定ZMP上における前記ロボットの機体のヨー角回りモーメントを算出するモーメント算出手段と、

該算出されたヨー角回りモーメントを減少させる上肢運動パターンを算出する運動パターン算出手段と、

該算出された上肢運動パターンに基づいて、上記設定された運動パターンを修正する運動パターン修正手段と、を具備することを特徴とするロボット装置。

【請求項30】前記運動パターン設定手段により設定される運動パターンは、少なくとも前記ロボットの上肢又は体幹部又は下肢のうちいずれかの運動パターンである。ことを特徴とする請求項29に記載のロボット装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、生体のメカニズムや動作を模した構造を有するリアリスティックなロボットのための動作制御装置及び動作制御方法、並びにロボット装置に係り、特に、ヒトやサルなどの直立歩行型の身体メカニズムや動作を模した構造を有する脚式移動ロボットのための動作制御装置及び動作制御方法、並びにロボット装置に関する。

【0002】さらに詳しくは、本発明は、高速歩行などの脚式作業を安定且つ正確に実現する脚式移動ロボットのための動作制御装置及び動作制御方法、並びにロボット装置に係り、特に、歩行などの脚式作業時に機体に印加されるロール、ピッチ、ヨー各角回りのモーメントの影響をキャンセルしながら安定且つ正確に駆動する脚式移動ロボットのための動作制御装置及び動作制御方法、並びにロボット装置に関する。

【0003】

【従来の技術】電気的若しくは磁気的な作用を用いて人間の動作に似せた運動を行う機械装置のことを「ロボット」という。ロボットの語源は、スラブ語の「ROBOT A (双輪機械)」に由来すると言われている。わが国においてロボットが普及し始めたのは1960年代末からであるが、その多くは、工場における生産作業の自動化・無人化などを目的としたマニピュレータや搬送ロボットなどの産業用ロボット(industrial robot)であった。

【0004】アーム式ロボットのように、ある特定の場

所に設置して用いるような据置きタイプのロボットは、部品の組立・選別作業など固定的・局所的な作業空間でのみ活動する。これに対し、移動式のロボットは、作業空間は非限定的であり、所定の経路上または無経路上を自在に移動して、所定の若しくは任意の人的作業を代行したり、ヒトやイヌあるいはその他の生命体に置き換わる種々の幅広いサービスを提供することができる。なかでも脚式の移動ロボットは、クローラ式やタイヤ式の移動ロボットに比し不安定で姿勢制御や歩行制御が難しくなるが、階段や梯子の昇降や障害物の乗り越えや、整地・不整地の区別を問わない柔軟な歩行・定行動作を表現できるという点で優れている。

【0005】最近では、イヌやネコのように4足歩行の動物の身体メカニズムやその動作を模したペット型ロボット、あるいは、ヒトのような2足直立歩行を行う動物の身体メカニズムや動作をモデルにしてデザインされた「人間形」若しくは「人間型」のロボット(humanoid robot)など、脚式移動ロボットに関する研究開発が進展し、実用化への期待もますます高まってきている。

【0006】人間形若しくは人間型と呼ばれる2足直立歩行の脚式移動ロボットを研究・開発する意義を、例えば以下の2つの視点から把握することができよう。

【0007】1つは、人間科学的な視点である。すなわち、人間の下肢及び/又は上肢に似た構造のロボットを作り、その制御方法を考察して、人間の歩行動作をシミュレートするというプロセスを通じて、歩行を始めとする人間の自然な動作のメカニズムを工学的に解明することができる。このような研究成果は、人間工学、リハビリテーション工学、あるいはスポーツ科学など、人間の運動メカニズムを扱う他のさまざまな研究分野の進展に大いに還元することができるであろう。

【0008】もう1つは、人間のパートナーとして生活を支援する、すなわち住環境その他の日常生活上の様々な場面における人的活動の支援を行う実用ロボットの開発である。この種のロボットは、人間の生活環境のさまざまな局面において、人間から教わりながら個々の相違する人間又は環境への適応方法を学習し、機能面でさらに成長していく必要がある。このとき、ロボットが「人間形」すなわち人間と同じ形又は同じ構造をしている方が、人間とロボットとのスムーズなコミュニケーションを行う上で有効に機能するものと考えられる。

【0009】例えば、踏んではならない障害物を避けながら部屋を通り抜ける方法を実地においてロボットに教示するような場合、クローラ式や4足式ロボットのように教える相手が自分と全く違う構造をしているよりも、同じような格好をしている2足歩行ロボットの方が、ユーザ(作業員)ははるかに教え易く、またロボットにとっても教わり易い筈である(例えば、高西善「2足歩行ロボットのコントロール」(自動技術会関東支部<高西>No.25, 1996 APRIL)を参照のこと)。

【0010】2足歩行による脚式移動を行うタイプのロボットに関する姿勢制御や安定歩行に関する技術は既に数多く提案されている。ここで言う安定な「歩行」とは、「転倒することなく、胸を使って移動すること」と定義することができる。

【0011】ロボットの姿勢安定制御は、ロボットの転倒を回避する上で非常に重要である。何故ならば、転倒は、ロボットが実行中の作業を中断することを意味し、且つ、転倒状態から起き上がって作業を再開するために相当の労力や時間が払われるからである。また、何よりも、転倒によって、ロボット本体自体、あるいは転倒するロボットと衝突する相手側の物体にも、致命的な損傷を与えてしまう危険があるからである。したがって、脚式移動ロボットの設計・開発において、歩行やその他の脚式作業時における姿勢安定制御は最も重要な技術的課題の1つである。

【0012】歩行時には、重力と歩行運動に伴って生じる加速度によって、歩行系から路面には重力と慣性力、並びにこれらのモーメントが作用する。いわゆる「ダランベールの原理」によると、それらは路面から歩行系への反作用としての床反力、床反力モーメントとバ

ランスする。力学的推論の帰結として、足底接地点と路面の形成する支持多角形の辺上あるいはその内側にピッチ及びロール軸モーメントがゼロとなる点、すなわち「ZMP (Zero Moment Point)」が存在する。

【0013】脚式移動ロボットの姿勢安定制御や歩行時の転倒防止に関する提案の多くは、このZMPを歩行の安定度判別の規程として用いたものである。ZMP規程に基づく2足歩行パターン生成は、足底着地点をあらかじめ設定することができ、路面形状に応じた足先の運動学的拘束条件を考慮し易いなどの利点がある。また、ZMPを安定度判別規程とすることは、力ではなく軌道を運動制御上の目標値として扱うことを意味するので、技術的に実現可能性が高まる。なお、ZMPの概念並びにZMPを歩行ロボットの安定度判別規程に適用する点については、Mikami Yukobratovic著「LEGGED LOCOMOTION ROBOTS」(加藤一郎外著「歩行ロボットと人工の足」(日刊工業新聞社))に記載されている。

【0014】一般には、4足歩行よりもヒューマノイドのような2足歩行のロボットの方が、重心位置が高く、且つ、歩行時のZMP安定領域が狭い。したがって、このような路面状態の変化に伴う姿勢変動の問題は、2足歩行ロボットにおいてとりわけ重要となる。

【0015】2足歩行ロボットの姿勢安定度判別規程にZMPを用いた提案は既に幾つかある。

【0016】例えば、特開平5-305579号公報に記載の脚式移動ロボットは、ZMPがゼロとなる床面上の点を目標値に一致させるようにして安定歩行を行うようになっている。

【0017】また、特開平5-305581号公報に記

載の脚式移動ロボットは、ZMPが支持多面体(多角形)内部、又は、着地、離床時にZMPが支持多角形の端部から少なくとも所定の余裕を有する位置にあるように構成した。この場合、外乱などを受けても所定距離だけZMPの余裕があり、歩行時の機体の安定性が向上する。

【0018】また、特開平5-305583号公報には、脚式移動ロボットの歩き速度をZMP目標位置によって制御する点について開示している。すなわち、あらかじめ設定された歩行パターン・データを用い、ZMPを目標位置に一致させるように脚部関節を駆動するとともに、上体の傾斜を検出してその検出値に応じて設定された歩行パターン・データの吐き出し速度を変更する。未知の凹凸を踏んでロボットが例えば前傾するときは、吐き出し速度を遅めることで姿勢を回復することができる。またZMPを目標位置に制御するので、両脚支持間で吐き出し速度を変更しても支障がない。

【0019】また、特開平5-305585号公報には、脚式移動ロボットの着地位置をZMP目標位置によって制御する点について開示している。すなわち、同公報に記載の脚式移動ロボットは、ZMP目標位置と実測位置とのずれを検出し、それを解消するように脚部の一方又は双方を駆動するか、又はZMP目標位置まわりにモーメントを検出してそれが零になる様に脚部を駆動することで、安定歩行を実現する。

【0020】また、特開平5-305586号公報には、脚式移動ロボットの傾斜姿勢をZMP目標位置によって制御する点について開示している。すなわち、ZMP目標位置まわりのモーメントを検出し、モーメントが生じたときは、それが零になるように脚部を駆動することで安定歩行を行う。

【0021】上述したように、ZMPを安定度判別規程に用いたロボットの姿勢安定制御は、足底接地点と路面の形成する支持多角形の辺上あるいはその内側にピッチ及びロール軸モーメントがゼロとなる点を探索することにある。

【0022】しかしながら、本発明者等の実験的な検証の結果、ロボットが高速に脚式動作する際には、機体に対してはピッチ軸並びにロール軸回りのモーメントだけでなく、ヨー軸すなわちZ軸回りにもモーメントが発生することが判明した。

【0023】図11には、2足脚式移動ロボットの歩行速度[秒/歩]とヨー軸方向に発生するモーメントNmとの関係(例)を表している。同図からも判るように、脚式移動ロボットが1歩当りに要する時間が短くなる、すなわち歩行速度が増加するにつれて、ヨー軸モーメントは著しく増大していく。

【0024】このようなヨー軸モーメントは、やがて機体を旋回させるような作用を及ぼし、ロボットの足底と路面間にヨー軸回りの滑りが生じ、これが歩行の安定性

に大きく影響するなど、期待された脚式作業を安定且つ正確に実現する上で障害となる。さらに、このヨー軸モーメントの影響が甚だしくなると、ロボットを転倒へと導き、期待や衝突物の損壊という事態も招きかねない。

【0025】例えば、本出願人に既に譲渡されている特開2000-206531号明細書には、任意の足部運動パターン、ZMP軌道、体幹運動パターン、上肢運動パターンに基づいて腰部運動パターンを導出することによって、2足脚式移動ロボットの安定歩行を実現した全身運動パターンを得る点について開示されている。同明細書に記載のロボットの歩行制御装置及び歩行制御方法によれば、ロボットが直立不動時や普通歩行時など様々な動作状態であっても、安定歩行するように下肢の歩容を決定することができる。特に、直立不動時に上体を用いた身振り・手振りの動作を印加した場合には、かかる上体の歩容に応じて、安定歩行できるような下肢の歩容を決定することができる。

【0026】しかしながら、同明細書では、足部、体幹、そして上肢の運動によってロボットの機体に生じる設定ZMP上のロール軸並びにピッチ軸回りのモーメント M_x 、 M_y をキャンセルすることによって安定歩行可能な全身協調運動を導出する点について記載されているものの、かかる全身協調運動の際に発生するヨー軸回りのモーメント M_z については考慮していない。

【0027】センサなどにより機体のヨー軸回りの滑りを検知した後、腕を振るなどのヨー軸回りのモーメントを打ち消すための補正制御を行う方法も考えられる。しかしながら、この場合は事後的に補正制御を行うので、どうしても多少滑ってしまうという問題点がある。

【0028】また、腕を振るなどの動作は、重力と気圧係数面の運動なので、モーメントを打ち消した後、さらに腕を所望の位置へ戻す制御が必要になる。

【0029】さらに、2方向の運動を共有してしまう回転型の関節で構成された人間形の腕を用いる場合には、ヨー軸回りのモーメントを打ち消すために腕を振ると、同時に、ロボットの安定性を損なう。ピッチ軸回り、ロール軸回りのモーメントをも発生してしまいがちである。

【0030】つまり、ヨー軸の滑りを抑制するために事後的に腕を振ると、ヨー軸回りの滑りは治るものの、歩行そのものが不安定になってしまうという問題が生じる。

【0031】この現象は、特に高速で運動する程大きくなり、高速運動（走行）を行うロボットには好ましい制御ではない。

【0032】さらに付言すれば、人間形の腕を用いて、ヨー軸回りのモーメントのみを発生させるには非人間的で不自然な運動になり易く（例えば、2方向に運動が発生しないように、水平面内でバーベルを回すような運動）、表現力が重要視されるエンターテインメント用のロ

ボットとしては致命的である。

【0033】

【発明が解決しようとする課題】本発明の目的は、直立歩行型の身体メカニズムや動作を模した構造を有する脚式移動ロボットのための、優れた動作制御装置及び動作制御方法、並びにロボット装置、並びにロボット装置を提供することにある。

【0034】本発明のさらなる目的は、高速歩行などの脚式作業を安定且つ正確に実現することができる、脚式移動ロボットのための優れた動作制御装置及び動作制御方法、並びにロボット装置を提供することにある。

【0035】本発明のさらなる目的は、脚式作業時に印加されるロール、ピッチ、ヨー各軸回りのモーメントの影響をキャンセルしながら機体を安定且つ正確に駆動することができる、脚式移動ロボットのための優れた動作制御装置及び動作制御方法、並びにロボット装置を提供することにある。

【0036】

【課題を解決するための手段及び作用】本発明は、上記課題を参酌してなされたものであり、その第1の側面は、少なくとも上肢と体幹部と下肢で構成され、下肢による脚式移動を行うタイプのロボットの動作制御装置又は動作制御方法であって、少なくとも上肢、体幹、下肢のいずれかについての運動を設定する手段又はステップと、該設定された上肢、体幹部、下肢の運動によって生じる設定ZMP上におけるロボットの機体のヨー軸モーメントを算出する手段又はステップと、該ヨー軸モーメントを打ち消す上肢運動を算出する手段又はステップと、該算出された上肢運動に従って、該設定された上肢、体幹、下肢の運動を修正する手段又はステップと、を具備することを特徴とする脚式移動ロボットのための動作制御装置又は動作制御方法である。

【0037】【従来の技術】簡でも説明したように、とりわけ2足歩行型の足式移動ロボットにおいては、歩行速度の増加とともに機体に加わるヨー軸モーメントが著しく増大していく。このようなヨー軸モーメントは、機体の旋回や路面に対するヨー軸回りの滑り、さらにはバランスを失うことに伴う機体の転倒など、安定且つ正確な脚式作業を実現する上で障害となる。

【0038】本発明の第1の側面に係る脚式移動ロボットの動作制御装置並びに動作制御方法によれば、下肢、体幹部、上肢の運動の組み合わせからなる機体の運動パターンを実行する際に設定ZMP上で機体に生じるヨー軸モーメントを上肢運動によって打ち消すことができる。

【0039】本発明の第1の側面に係る脚式移動ロボットの動作制御装置並びに動作制御方法によれば、ZMP上のヨー軸モーメントがほぼゼロとなるヨー軸回りに極めて滑りにくい運動を前以って生成するため、機体はヨー軸回りにはほとんど滑らない。特に、動きそのものが

重要なエンターテインメント用途のロボットには、なくてはならない技術である。なお、ロボットにヨー軸回りのモーメントが印加された場合には、ピッチ軸、ロール軸、ヨー軸の3面の運動を同時に解くため、ヨー軸回りのモーメントを打ち消すための動作によって、ピッチ軸、ロール軸回りのモーメントを発生させることもない。

【0040】したがって、下肢や体幹部による脚式作業を継続しつつ、上肢の運動によって歩行やその他の脚式作業時における安定性を維持することができる。

【0041】上肢の運動は、より具体的には、肩関節や肘関節の駆動を利用した運動である。勿論、左右の各上肢は一般的には逆位相の動きであるが、本発明を実現する上で特にこれに限定する必要はない。

【0042】一般的な直立2足歩行型のロボットの機体設計によれば、体幹部（例えば体幹ヨー軸）よりも肩関節や肘関節の方が広い可動角を持つので、このような上肢の運動により、機体のヨー軸モーメントを効率的且つ高精度に打ち消して、高度な姿勢安定性を実現することができる。

【0043】また、このような上肢運動は、ロボットの上半身の動作を表現力豊かに見せるといった演出効果がある。

【0044】また、本発明の第2の側面は、少なくとも上肢と体幹部と下肢で構成され、下肢による脚式移動を行うタイプのロボットの動作制御装置又は動作制御方法であって、少なくとも上肢、体幹、下肢のいずれかについての運動を設定する手段又はステップと、該設定された上肢、体幹部、下肢の運動によって生じる設定ZMP上におけるロボットの機体のピッチ軸及び／又はロール軸モーメントを算出する手段又はステップと、該ピッチ軸及び／又はロール軸モーメントを打ち消す下肢、体幹部の運動を算出する手段又はステップと、該算出された下肢、体幹部の運動によって生じる設定ZMP上におけるロボットの機体のヨー軸モーメントを算出する手段又はステップと、該ヨー軸モーメントを打ち消す上肢運動を算出する手段又はステップと、該算出された上肢、体幹部、下肢の運動に従って、該設定された上肢、体幹、下肢の運動を修正する手段又はステップと、を具備することを特徴とする脚式移動ロボットのための動作制御装置又は動作制御方法である。

【0045】2足歩行型の脚式移動ロボットが、上肢、体幹部、下肢の運動からなる全身運動を行う場合、ロボットの機体には、ピッチ軸、ロール軸、並びにヨー軸の各軸回りにモーメントが発生する。

【0046】本発明の第2の側面に係る脚式移動ロボットのための動作制御装置又は動作制御方法によれば、下肢、体幹部、上肢の運動の組み合わせからなる機体の運動パターンを実行する際に設定ZMP上で機体に生じるピッチ軸及びロール軸回りの各モーメントを打ち消す下

肢及び体幹部の運動を算出した後、さらに、この下肢及び体幹部の運動によって設定ZMP上において機体に生じるヨー軸回りのモーメントを打ち消すような上肢の運動を算出することができる。したがって、歩行などの脚式作業時に機体に印加されるロール、ピッチ、ヨー各軸回りのモーメントの影響をキャンセルしながら安定且つ正確な全身協調運動を実現することができる。

【0047】とりわけ2足歩行型の脚式移動ロボットにおいては、歩行速度の増加とともに機体に加わるヨー軸モーメントが著しく増大していくが、このようなヨー軸モーメントは、機体の旋回や諸面に対するヨー軸回りの滑りや機体の転倒など機体動作の障害となるが、本発明の第2の側面によれば、これを好適に取り除くことができる。

【0048】また、本発明の第2の側面に係る脚式移動ロボットの動作制御装置並びに動作制御方法によれば、ZMP上のヨー軸モーメントがほぼゼロとなるヨー軸回りに極めて滑りにくい運動を前以って生成するため、機体はヨー軸回りにはほとんど滑らない。ロボットにヨー軸回りのモーメントが印加された場合には、ピッチ軸、ロール軸、ヨー軸の3面の運動を同時に解くため、ヨー軸回りのモーメントを打ち消すための動作によって、ピッチ軸、ロール軸回りのモーメントを発生させることもない。

【0049】したがって、下肢や体幹部による脚式作業を継続しつつ、上肢の運動によって歩行やその他の脚式作業時における安定性を維持することができる。

【0050】上肢の運動は、より具体的には、肩関節や肘関節の駆動を利用した運動である。勿論、本発明の要旨を、左右の各上肢が逆位相又は対称的な動きに限定する必要はない。

【0051】一般的な直立2足歩行型のロボットの機体設計によれば、体幹部（例えば体幹ヨー軸）よりも肩関節や肘関節の方が広い可動角を持つので、このような上肢の運動により、機体のヨー軸モーメントを効率的且つ高精度に打ち消して、高度な姿勢安定性を実現することができる。また、このような上肢運動は、ロボットの上半身の動作を表現力豊かに見せるといった演出効果がある。

【0052】また、本発明の第3の側面は、少なくとも上肢と体幹部と下肢で構成され、下肢による脚式移動を行うタイプのロボットの動作制御装置又は動作制御方法であって、(a)要求された動作を実現するための少なくとも足部運動、体幹運動、上肢運動、腰部の姿勢及び高さのうちいずれかを設定する手段又はステップと、

(b)前記手段又はステップ(a)により設定された足部運動に基づいてZMP軌道を設定する手段又はステップと、(c)前記手段又はステップ(a)により設定された足部、体幹、上肢の運動によって前記手段又はステップ(b)により設定されたZMP上で生じる前記脚式

移動ロボットのピッチ軸及びロール軸回りのモーメントを算出する手段又はステップと、(d)前記手段又はステップ(c)により算出されたピッチ軸及びロール軸回りのモーメントを打ち消す腰部運動の解を求める手段又はステップと、(e)前記手段又はステップ(d)により求められた腰部運動によって前記手段又はステップ(b)により設定されたZMP上で前記脚式移動ロボットのヨー軸回りに生じるモーメントを算出する手段又はステップと、(f)前記手段又はステップ(e)により算出されたヨー軸回りのモーメントを打ち消す上肢運動の解を求める手段又はステップと、(g)前記手段又はステップ(d)及び前記手段又はステップ(f)により求められた腰部運動及び上肢運動に基づいて前記脚式移動ロボットの全身運動を導出する手段又はステップと、を具備することを特徴とする脚式移動ロボットのための動作制御装置又は動作制御方法である。

【0053】本発明の第3の側面に係る脚式移動ロボットのための動作制御装置又は動作制御方法によれば、下肢、体幹部、上肢の運動の組み合わせからなる機体の運動パターンを実行する際に設定ZMP上で機体に生じるピッチ軸及びロール軸回りの各モーメントを打ち消す下肢及び体幹の運動を算出した後、さらに、この下肢及び体幹の運動によって設定ZMP上において機体に生じるヨー軸回りのモーメントを打ち消すような上肢の運動を算出することによって、脚式作業時に機体に印加されるロール、ピッチ、ヨー各軸回りのモーメントの影響をキャンセルしながら安定且つ正確な全身協調運動を実現することができる。

【0054】また、本発明の第3の側面に係る脚式移動ロボットの動作制御装置並びに動作制御方法によれば、ZMP上のヨー軸モーメントがほぼゼロとなるヨー軸回りに極めて滑りにくい運動を前以て生成するため、機体はヨー軸回りにほとんど滑らない。ロボットにヨー軸回りのモーメントが印加された場合には、ピッチ軸、ロール軸、ヨー軸の3面の運動を同時に解くため、ヨー軸回りのモーメントを打ち消すための動作によって、ピッチ軸、ロール軸回りのモーメントを発生させることもない。

【0055】また、本発明の第4の側面は、少なくとも上肢と体幹部と下肢で構成され、下肢による脚式移動を行うタイプのロボットの動作制御装置又は動作制御方法であって、(A)要求された動作を実現するための少なくとも足部運動、体幹運動、上肢運動、腰部の姿勢及び高さのうちいずれかを設定する手段又はステップと、(B)前記手段又はステップ(A)により設定された足部運動に基づいてZMP軌道を設定する手段又はステップと、(C)前記脚式移動ロボットの非厳密モデルを用いて、前記手段又はステップ(A)により設定された足部、体幹、上肢の運動によって前記手段又はステップ(B)により設定されたZMP上で生じる前記脚式移動

ロボットのピッチ軸及びロール軸回りのモーメントを算出する手段又はステップと、(D)前記手段又はステップ(C)により算出されたピッチ軸及びロール軸回りのモーメントを打ち消す腰部運動の近似解を求める手段又はステップと、(E)前記脚式移動ロボットの非厳密モデルを用いて、前記手段又はステップ(D)により求められた腰部運動の近似解によって前記手段又はステップ(B)により設定されたZMP上で前記脚式移動ロボットのヨー軸回りに生じるモーメントを算出する手段又はステップと、(F)前記手段又はステップ(E)により算出されたヨー軸回りのモーメントを打ち消す上肢運動の近似解を求める手段又はステップと、(G)前記脚式移動ロボットの厳密モデルを用いて、前記手段又はステップ(D)及び前記手段又はステップ(F)により算出された全身運動実行時における前記手段又はステップ(B)により設定されたZMP上で生じる前記脚式移動ロボットのピッチ軸、ロール軸、及びヨー軸回りのモーメントを算出する手段又はステップと、(H)前記手段又はステップ(G)により算出されたピッチ軸、ロール軸、及びヨー軸回りのモーメントが所定の許容値未満であれば全身運動の解とする手段又はステップと、(I)前記手段又はステップ(G)により算出されたピッチ軸、ロール軸、及びヨー軸回りのモーメントが所定の許容値以上であれば、設定ZMP上における非厳密モデルのモーメントを修正して、前記手段又はステップ(D)又は前記手段又はステップ(F)に再投入する手段又はステップと、を具備することを特徴とする脚式移動ロボットのための動作制御装置又は動作制御方法である。

【0056】本発明の第4の側面に係る脚式移動ロボットのための動作制御装置又は動作制御方法によれば、下肢、体幹部、上肢の運動の組み合わせからなる機体の運動パターンを実行する際に設定ZMP上で機体に生じるピッチ軸及びロール軸回りの各モーメントを打ち消す下肢及び体幹の運動を算出した後、さらに、この下肢及び体幹の運動によって設定ZMP上において機体に生じるヨー軸回りのモーメントを打ち消すような上肢の運動を算出することによって、脚式作業時に機体に印加されるロール、ピッチ、ヨー各軸回りのモーメントの影響をキャンセルしながら安定且つ正確な全身協調運動を実現することができる。

【0057】また、本発明の第4の側面に係る脚式移動ロボットの動作制御装置並びに動作制御方法によれば、ZMP上のヨー軸モーメントがほぼゼロとなるヨー軸回りに極めて滑りにくい運動を前以て生成するため、機体はヨー軸回りにほとんど滑らない。ロボットにヨー軸回りのモーメントが印加された場合には、ピッチ軸、ロール軸、ヨー軸の3面の運動を同時に解くため、ヨー軸回りのモーメントを打ち消すための動作によって、ピッチ軸、ロール軸回りのモーメントを発生させることもない。

【0058】本発明の第4の側面に係る脚式移動ロボットのための動作制御装置又は動作制御方法において、非厳密モデルは前記脚式移動ロボットに関する線形及び／又は非干渉の多質点近似モデルであってもよい。また、厳密モデルは前記ロボットに関する剛体モデル、又は、非線形及び／又は干渉の多質点近似モデルであってもよい。

【0059】また、(F') 腰部運動の近似解を求める前記手段又はステップ(D)及び／又は上肢運動の近似解を求める前記手段又はステップ(F)において求めた近似解ではあらかじめ設定した体幹・上肢運動が実現できない場合に、体幹・上肢運動パターンの再設定・修正を行う手段又はステップをさらに備えていてもよい。

【0060】また、前記の腰部運動の近似解を求める手段又はステップ(D)は、足部運動、体幹運動、上肢運動によって生じる設定ZMP上のモーメントと、腰部の水平面内運動によって生じる設定ZMP上のモーメントとの釣合方程式を解くことによって腰部運動の近似解を求めるようにしてもよい。

【0061】また、前記の腰部運動の近似解を求める手段又はステップ(D)は、時間の関数を周波数の関数に置き換えて計算するようにしてもよい。より具体的に言えば、足部運動、体幹運動、上肢運動によって生じる設定ZMP上のモーメントにフーリエ級数展開を適用するとともに、腰部の水平面内運動にフーリエ級数展開を適用して、腰部水平面内軌道のフーリエ係数を算出して、さらに逆フーリエ級数展開を適用することによって腰部運動の近似解を求めるようにしてもよい。

【0062】また、前記の上肢運動の近似解を求める手段又はステップ(F)は、足部運動、体幹運動によって生じる設定ZMP上のモーメントの釣合方程式を解くことによって上肢運動の近似解を求めるようにしてもよい。

【0063】また、前記の上肢運動の近似解を求める手段(F)は、時間の関数を周波数の関数に置き換えて計算するようにしてもよい。より具体的に言えば、前記の上肢運動の近似解を求める手段(F)は、足部運動、体幹運動によって生じる設定ZMP上のモーメントにフーリエ級数展開を適用してフーリエ係数を算出して、さらに逆フーリエ級数展開を適用することによって上肢運動の近似解を求めるようにしてもよい。

【0064】また、本発明の第5の側面は、少なくとも上肢と体幹部と下肢で構成され、下肢による脚式移動を行うロボット装置において、前記ロボットの運動パターンを設定する運動パターン設定手段と、該設定された運動パターンにより生じる設定ZMP上における前記ロボットの機体のヨー軸回りモーメントを算出するモーメント算出手段と、該算出されたヨー軸回りモーメントを減少させる上肢運動パターンを算出する運動パターン算出手段と、該算出された上肢運動パターンに基づいて、上

記設定された運動パターンを修正する運動パターン修正手段と、を具備することを特徴とするロボット装置である。

【0065】ここで、前記運動パターン設定手段は、少なくとも前記ロボットの上肢又は体幹部又は下肢のうちのいずれかの運動パターンを設定するものとする。

【0066】2足歩行型の脚式移動ロボットが、上肢、体幹部、下肢の運動からなる全身運動を行う場合、ロボットの機体には、ピッチ軸、ロール軸、並びにヨー軸の各軸回りにモーメントが発生する。

【0067】本発明の第5の側面に係るロボット装置によれば、下肢、体幹部、上肢の運動の組み合わせからなる機体の運動パターンを実行する際に設定ZMP上で機体に生じるヨー軸回りのモーメントを打ち消すような上肢運動パターンを算出して運動パターンを修正することができる。したがって、歩行などの脚式作業時に機体に印加されるヨー軸回りのモーメントの影響をキャンセルしながら安定且つ正確な全身協調運動を表現することができる。

【0068】とりわけ2足歩行型の脚式移動ロボットにおいては、歩行速度の増加とともに機体に加わるヨー軸モーメントが著しく増大していくが、このようなヨー軸モーメントは、機体の旋回や路面に対するヨー軸回りの滑りや機体の転倒など機体動作の障害となるが、本発明の第5の側面によれば、これを好適に取り除くことができる。

【0069】また、本発明の第5の側面に係るロボット装置によれば、ZMP上のヨー軸モーメントがほぼゼロとなるヨー軸回りに極めて滑りにくい運動を前記して生成するため、機体はヨー軸回りにはほとんど滑らない。

【0070】本発明のさらに他の目的、特徴や利点は、後述する本発明の実施形態や添付する図面に基づくより詳細な説明によって明らかになるであろう。

【0071】

【発明の実施の形態】以下、図面を参照しながら本発明の実施形態について詳解する。

【0072】図1及び図2には本発明の実施に供される脚式移動ロボット100を前方及び後方の各々から眺望した様子を示している。さらに、図3には、この脚式移動ロボット100が具備する関節自由度構成を模式的に示している。

【0073】図3に示すように、脚式移動ロボット100は、2本の腕部と頭部1を含む上肢と、移動動作を実現する2本の脚部からなる下肢と、上肢と下肢とを連結する体幹部とで構成される。

【0074】頭部1を支持する首関節は、首関節ヨー軸2と、首関節ピッチ軸3と、首関節ロール軸4という3自由度を有している。

【0075】また、各腕部は、肩関節ピッチ軸8と、肩関節ロール軸9と、上腕ヨー軸10と、肘関節ピッチ軸

10

20

30

40

50

11と、前腕ヨー軸12と、手首関節ピッチ軸13と、手首関節ロール軸14と、手部15とで構成される。手部15は、実際には、複数本の指を含む多関節・多自由度構造体である。但し、手部15の動作はロボット100の姿勢制御や歩行制御に対する寄与や影響が少ないので、本明細書ではゼロ自由度と仮定する。したがって、各腕部は7自由度を有するとする。

【0076】また、体幹部は、体幹ピッチ軸5と、体幹ロール軸6と、体幹ヨー軸7という3自由度を有する。

【0077】また、下肢を構成する各々の脚部は、股関節ヨー軸16と、股関節ピッチ軸17と、股関節ロール軸18と、膝関節ピッチ軸19と、足首関節ピッチ軸20と、足首関節ロール軸21と、足部22とで構成される。本明細書中では、股関節ピッチ軸17と股関節ロール軸18の交点は、本実施例に係るロボット100の股関節位置を定義する。人体の足部22は実際には多関節・多自由度の足底を含んだ構造体であるが、本実施例に係る脚式移動ロボット100の足底はゼロ自由度とする。したがって、各脚部は6自由度で構成される。

【0078】以上を総括すれば、本実施例に係る脚式移動ロボット100全体としては、合計で $3+7 \times 2+3+6 \times 2=32$ 自由度を有することになる。但し、エンターテインメント向けの脚式移動ロボット100が必ずしも32自由度に限定される訳ではない。設計・製作上の制約条件や要求仕様等に応じて、自由度すなわち関節数を適宜増減することができることは言うまでもない。

【0079】上述したような脚式移動ロボット100が持つ各自由度は、実際にはアクチュエータを用いて実装される。外観上で余分な膨らみを排してヒトの自然体形状に近似させること、2足歩行という不安定構造体に対して姿勢制御を行うことなどの要請から、アクチュエータは小型且つ軽量であることが好ましい。本実施例では、ギア直結型で且つサーボ制御系をワンチップ化してモータ・ユニットに内蔵したタイプの小型ACサーボ・アクチュエータを搭載することとした。なお、この種のACサーボ・アクチュエータに関しては、例えば本出願人に既に譲渡されている特開2000-299970号公報（特願平11-33386号明細書）に開示されている。

【0080】図4には、脚式移動ロボット100の制御システム構成を模式的に示している。同図に示すように、脚式移動ロボット100は、ヒトの四肢を表現した各機構ユニット30、40、50R/L、60R/Lと、各機構ユニット間の協調動作を実現するための適応制御を行う制御ユニット80とで構成される（但し、R及びLの各々は、右及び左の各々を示す接尾辞である。以下同様）。

【0081】脚式移動ロボット100全体の動作は、制御ユニット80によって統括的に制御される。制御ユニット80は、CPU（Central Processing Unit）やメ

モリ等の主要回路コンポーネント（図示しない）で構成される主制御部81と、電源回路やロボット100の各構成要素とのデータやコマンドの授受を行うインターフェース（いずれも図示しない）などを含んだ周辺回路82とで構成される。

【0082】本発明を實現する上で、この制御ユニット80の設置場所は特に限定されない。図4では体幹部ユニット40に搭載されているが、頭部ユニット30に搭載してもよい。あるいは、脚式移動ロボット100外に制御ユニット80を配備して、脚式移動ロボット100の機体とは有線若しくは無線で交信するようにしてもよい。

【0083】図3に示した脚式移動ロボット100内の各関節自由度は、それぞれに対応するアクチュエータによって實現される。すなわち、頭部ユニット30には、首関節ヨー軸2、首関節ピッチ軸3、首関節ロール軸4の各々を表現する首関節ヨー軸アクチュエータ A_2 、首関節ピッチ軸アクチュエータ A_3 、首関節ロール軸アクチュエータ A_4 が配設されている。

【0084】また、体幹部ユニット40には、体幹ピッチ軸5、体幹ロール軸6、体幹ヨー軸7の各々を表現する体幹ピッチ軸アクチュエータ A_5 、体幹ロール軸アクチュエータ A_6 、体幹ヨー軸アクチュエータ A_7 が配設されている。

【0085】また、腕部ユニット50R/Lは、上腕ユニット51R/Lと、肘関節ユニット52R/Lと、前腕ユニット53R/Lに細分化されるが、肩関節ピッチ軸8、肩関節ロール軸9、上腕ヨー軸10、肘関節ピッチ軸11、肘関節ロール軸12、手首関節ピッチ軸13、手首関節ロール軸14の各々を表現する肩関節ピッチ軸アクチュエータ A_8 、肩関節ロール軸アクチュエータ A_9 、上腕ヨー軸アクチュエータ A_{10} 、肘関節ピッチ軸アクチュエータ A_{11} 、肘関節ロール軸アクチュエータ A_{12} 、手首関節ピッチ軸アクチュエータ A_{13} 、手首関節ロール軸アクチュエータ A_{14} が配設されている。

【0086】また、脚部ユニット60R/Lは、大腿部ユニット61R/Lと、膝ユニット62R/Lと、脛部ユニット63R/Lに細分化されるが、股関節ヨー軸16、股関節ピッチ軸17、股関節ロール軸18、膝関節ピッチ軸19、足首関節ピッチ軸20、足首関節ロール軸21の各々を表現する股関節ヨー軸アクチュエータ A_{16} 、股関節ピッチ軸アクチュエータ A_{17} 、股関節ロール軸アクチュエータ A_{18} 、膝関節ピッチ軸アクチュエータ A_{19} 、足首関節ピッチ軸アクチュエータ A_{20} 、足首関節ロール軸アクチュエータ A_{21} が配設されている。

【0087】各関節に用いられるアクチュエータ A_2 、 A_3 …は、より好ましくは、ギア直結型で且つサーボ制御系をワンチップ化してモータ・ユニット内に搭載したタイプの小型ACサーボ・アクチュエータ（前述）で構成することができる。

【0088】頭部ユニット30、体幹部ユニット40、腕部ユニット50、各脚部ユニット60などの各機構ユニット毎に、アクチュエータ駆動制御用の副制御部35、45、55、65が配備されている。さらに、各脚部60R、Lの足底が着床したか否かを検出する接地確認センサ91及び92を装着するとともに、体幹部ユニット40内には、姿勢を計測する姿勢センサ93を装備している。

【0089】接地確認センサ91及び92は、例えば足底に設置された近接センサ又はマイクロスイッチなどで構成される。また、姿勢センサ93は、例えば、加速度センサとジャイロセンサの組み合わせによって構成される。

【0090】接地確認センサ91及び92の出力によって、歩行・走行などの動作期間中において、左右の各脚部が現在立脚又は遊脚いずれの状態であるかを判別することができる。また、姿勢センサ93の出力により、体幹部分の傾きや姿勢を検出することができる。

【0091】主制御部80は、各センサ91～93の出力に基いて制御目標をダイナミックに修正することができる。より具体的には、副制御部35、45、55、65の各々に対して適応的な制御を行い、脚式移動ロボット100の上肢、体幹、及び下肢が協調して駆動する全身運動パターンを実現することができる。

【0092】ロボット100の機体上での全身運動は、足部運動、ZMP（Zero Moment Point）軌道、体幹運動、上肢運動、腰部高さなどを設定するとともに、これらの設定内容に従った動作を指示するコマンドを各副制御部35、45、55、65に転送する。そして、各々の副制御部35、45…では、主制御部81からの受信コマンドを解釈して、各アクチュエータ A_1 、 A_2 …に対して駆動制御信号を出力する。ここで言う「ZMP」とは、歩行中の床反力によるモーメントがゼロとなる床面上の点のことであり、また、「ZMP軌道」とは、例えばロボット100の歩行動作期間中にZMPが動く軌道を意味する（前述）。

【0093】次いで、本実施形態に係る脚式移動ロボット100における、脚式作業時すなわち足部、腰、体幹、下肢運動などからなる全身協調運動パターンの実行時における姿勢の安定化処理の手順について説明する。

【0094】本実施形態に係る脚式移動ロボット100は無限のすなわち連続的な質点の集合体である。但し、ここでは有限数で離散的な質点からなる近似モデルに置き換えることによって、安定化処理のための計算量を削減するようにしている。より具体的には物理的には図3に示す多関節自由度構成を具備する脚式移動ロボット100を、図5に示すように多質点近似モデルに置き換えて取り扱う。図示の近似モデルは、線形且つ非干渉の多質点近似モデルである。

【0095】図5において、O-X-Y-Z座標系は絶対座

標系におけるロール、ピッチ、ヨー各軸を表し、また、O'-X'-Y'-Z'座標系はロボット100とともに動く運動座標系におけるロール、ピッチ、ヨー各軸を表している。同図に示す多質点モデルでは、 i は i 番目に与えられた質点を表す添え字であり、 m_i は i 番目の質点の質量、 r'_i は i 番目の質点の位置ベクトル（但し運動座標系）を表すものとする。また、後述する腰部運動制御において特に重要な腰部質点の質量は m_{10} 、その位置ベクトルは r'_{10} （ r'_{10x} 、 r'_{10y} 、 r'_{10z} ）とし、また、ZMPの位置ベクトルを r'_{100} （ r'_{100x} 、 r'_{100y} 、 r'_{100z} ）とする。

【0096】多質点モデルは、言わば、ワイヤフレームモデルの形態でロボットを表現したものである。図5を見ても判るように、多質点近似モデルは、両肩、両肘、両手首、体幹、腰部、及び、両足首の各々を質点として設定される。図示の非厳密な多質点近似モデルにおいては、モーメント式は線形方程式の形式で記述され、該モーメント式はピッチ軸及びロール軸に関して干渉しない。多質点近似モデルは、概ね以下の処理手順により生成することができる。

【0097】（1）ロボット100全体の質量分布を求める。

（2）質点を設定する。質点の設定方法は、設計者のマニュアル入力であっても、所定の規則に従った自動生成のいずれでも構わない。

（3）各領域 i 毎に、重心を求め、その重心位置と質量 m_i を該当する質点に付与する。

（4）各質点 m_i を、質点位置 r_i を中心とし、その質量に比例した半径に持つ球体として表示する。

（5）現実に関連関係のある質点すなわち球体同士を連結する。

【0098】なお、図5に示す多質点モデルの腰部情報における各回転角（ θ_{10x} 、 θ_{10y} 、 θ_{10z} ）は、脚式移動ロボット100における腰部の姿勢すなわちロール、ピッチ、ヨー軸の回転を規定するものである（図6には、多質点モデルの腰部周辺の拡大図を示しているため、確認されたい）。

【0099】次いで、本実施例に係る脚式移動ロボット100における姿勢安定化処理、すなわち腰、体幹、下肢などの運動により発生するモーメントをキャンセルした全身協調運動パターンの生成処理の手順について説明する。

【0100】図7及び図8には、脚式移動ロボット100において安定歩行可能な腰、体幹、下肢運動を生成するための処理手順の一例をフローチャートの形式で示している。但し、以下の説明では、図5に示すような線形・非干渉多質点近似モデルを用いて脚式移動ロボット100の各関節位置や動作を記述するものとし、且つ、計算に際して以下のようなパラメータを用いることとする。但し、ダッシュ（'）付きの記号は運動座標系を記

述するものと理解されたい。

【0101】

*【数1】

*

m_h : 腰部質点の質量

$\vec{r}_h(r'_{hx}, r'_{hy}, r'_{hz})$: 腰部質点の位置ベクトル

m_i : i 番目の質点の質量

\vec{r}_i : i 番目の質点の位置ベクトル

\vec{r}_{zmp} : ZMPの位置ベクトル

$\vec{g}(g_x, g_y, g_z)$: 重力加速度ベクトル

$O'-X'Y'Z'$: 運動座標系 (ロボットとともに動く)

$O-XYZ$: 絶対座標系

$$\vec{H} = \vec{r}'_{hz} + \vec{r}_{gz}$$

【0102】また、胸式移動ロボット100の腰部高さが一定 ($r'_{hz} + r_{gz} = \text{const}$) で、且つ、膝部質点がゼロであることを前提とする。

【0103】まず、足部 (より具体的には足底) 運動、足部運動から導出されるZMP軌道、体幹運動、上肢運動、腰部の姿勢や高さなど、各部の駆動・動作を実際に決定するためのパターンが設定される (ステップS11)。より具体的には、まず足部運動パターン、次いでZMP軌道、体幹運動パターン、そして上肢運動パターンを設定する。また、後述するヨー軸モーメント補償に用いる未知変数 (上肢運動に関する) を、ここで設定しておく。また、腰部の運動に関しては、 Z' 方向のみ設定し、 X' 及び Y' の各方向については未知とする。

【0104】次に、線形・非干渉多質点近似モデルを用いて、足部、体幹、そして上肢運動により発生する設定ZMP上でのピッチ軸回りのモーメント M_x 、並びにロ

※【0105】次いで、線形・非干渉多質点近似モデルを用いて、腰部水平面内運動 (r'_{hx} , r'_{hy}) によって発生する設定ZMP上でのピッチ軸回りのモーメント M_x 、並びにロール軸回りのモーメント M_z を算出する (ステップS13)。

【0106】次いで、設定ZMP上におけるピッチ軸及びロール軸回りのモーメントに関する釣り合い式を、ロボット100 (あるいはその多質点近似モデル) とともに動く運動座標系 $O'-X'Y'Z'$ 上で導出する (ステップS14)。より具体的には、足部、体幹、そして上肢運動により発生するピッチ軸回りのモーメント M_x 、並びにロール軸回りのモーメント M_z を既知変数の項として右辺に、腰部質点の水平運動に関する項 (r'_{hx} , r'_{hy}) を未知変数の項として左辺にまとめ、下式に示すような線形・非干渉なZMP方程式 (1) を導出する。

【0107】

【数2】

※

$$\begin{aligned} &+ m_h H(\ddot{r}'_{hx} + \ddot{r}'_{gz} + g_x) - m_h g_x (r'_{hz} - r'_{zmp_x}) = -M_x(t) \\ &- m_h H(\ddot{r}'_{hy} + \ddot{r}'_{gz} + g_y) + m_h g_x (r'_{hy} - r'_{zmp_y}) = -M_z(t) \end{aligned} \quad \cdots (1)$$

【0108】但し、以下が成立するものとする。

【0109】

【数3】

$$\vec{r}'_{hz} = 0$$

$$\vec{r}'_{gz} + \vec{r}_{gz} = \vec{H}(t)$$

$$H(t) = \text{const} \quad (\text{時間に関し一定})$$

【0110】次いで、上記のZMP方程式 (1) を解いて、腰部水平面内軌道を算出する (ステップS15)。例えば、オイラー法やルンゲ・クッタ法などの数値的解法 (周知) を用いてZMP方程式 (1) を解くことで、未知変数としての腰部の水平絶対位置 (r'_{hx} , r'_{hy}) の数値解を求めることができる (ステップS16)。ここで求められる数値解は、安定歩行可能な腰部運動パターンの近似解であり、より具体的にはZMPが目標位置

に入るような腰部水平絶対位置である。ZMP目標位置は、適宜、着床した足底に設定される。

【0111】ここで求められる近似解は、安定歩行可能な腰部運動パターンを規定する腰部の水平絶対位置の近似解 (r'_{hx} , r'_{hy}) であり、より具体的にはZMPが目標位置に入るような腰部水平絶対位置である。但し、足部、体幹、上肢、腰部などの運動により発生するピッチ軸回りのモーメント M_x 、並びにロール軸回りのモーメント M_z をキャンセルしたことになるが、まだヨー軸回りのモーメント M_y がキャンセルされずに残されている。そこで、後述のステップでは、ヨー軸回りのモーメント M_y のキャンセルするための上肢運動パターンの生成処理を行う。

【0112】ステップS17において、腰部運動の近似解によって生じる設定ZMP上のヨー軸モーメント (但

$$M_{\text{ex}}(t) = -m_h(\ddot{r}'_{\text{hx}} + \ddot{r}'_{\text{hy}} + g_x)(r'_{\text{hx}} - r'_{2m, p}) + m_h(\ddot{r}'_{\text{hx}} + \ddot{r}'_{\text{hy}} + g_y)(r'_{\text{hx}} - r'_{2m, p}) \quad \dots(2)$$

ern_albow) を ($\theta_{\text{hrr_elbow}} = G \times \theta_{\text{hrr_shoulder}}; G$ はゲイン) とすることで、未知変数を 1 つにしたままで (すなわち計算量を変えずに) 肩関節と肘関節の協調動作によるヨー軸補償運動パターンの算出を行うことができる。

【0120】勿論、ロボット100の上体の一部である体幹ヨー軸7を利用して上式(3)を成立させることも、理論上は可能であるが、可動角が広い肩関節や肘関節などの上肢の駆動を用いて上式(3)を成立させる方が機構上の実現が容易であり、且つ、高精度な制御が可能となる。

【0121】上記のステップS21までで算出された近似解上ではあらかじめ設定した体幹・上肢運動が実現できない場合には、体幹・上肢運動パターンの再設定・修正を行う（ステップS22）。この際、膝部の軌道を算出してよい。

【0122】次いで、上述のようにして得られた全身運動パターンを代入して、厳密モデル（すなわち、剛体、若しくは非常に多くの質点からなる脚式移動ロボット100の精密なモデル）における設定ZMP上におけるロール軸、ピッチ軸、及びヨー軸の各軸回りのモーメント（ eM_{x1} 、 eM_{y1} 、 eM_{z1} ）を算出する（ステップS23）。非厳密モデルでは上記の【数3】が成立することを前提としたが、厳密モデルにおいてはかかる前提を要しない（すなわち時間の変化に対して一定である必要はない）。

【0123】 厳密モデルにおけるモーメント (eM_x , eM_y , eM_z) は、腰部運動においてロール、ピッチ、ヨーそれぞれの軸回りに発生するモーメント誤差である。続くステップS24では、これら各軸回りのモーメント (eM_x , eM_y , eM_z) が許容値 (εM_x , εM_y , εM_z) 未満か否かを判定する。許容値 ε 未満であれば、ロボット100の機体上の腰、体幹、下肢の各部における安定運動パターンの厳密解、並びに機体（腰部）のヨー軸回りに発生するモーメント M_x と M_y をキャンセルしたロボット100の全身運動パターンを得ることができたことを意味するので（ステップS25）、本制御ルーチン全体を終了する。

【0124】他方、厳密モデルにおけるモーメント (eM_x , eM_y , eM_z) が許容値 (εM_x , εM_y , εM_z) 以上であった場合には、厳密モデルにおけるロール軸並びにピッチ軸回りのモーメント (eM_x , eM_y) を用いて近似モデルにおけるロール軸並びにピッチ軸回りのモーメント (M_x , M_y) を修正して (ステップS27)、

【0119】また、上式(3)を成立させる上で、右上肢と左上肢とが対称又は逆位相で動かすことを前提としていなくてもよい。未知変数 θ の取り方としては、大きなモーメントの発生量が期待できるものとして、肩関節のビッチ軸回りの関節角($\theta_{r.p.s.p.o.o.r.}$)を未知変数として用いることが挙げられる。あるいは、より人間の生体メカニズムに近いモーメント発生動作を期待できるものとしては、肩関節のビッチ軸回りの関節角($\theta_{r.p.s.p.o.o.r.}$)を未知変数にし、さらに肘関節角(θ)

再びZMP方程式の導出を行う。あるいは、厳密モデルにおけるヨー軸回りのモーメント既知発生モーメント eM_z を用いて近似モデルにおけるヨー軸回りの既知発生モーメント M_z を修正して(ステップS26)、再びZMP方程式の導出を行う。そして、許容値と未満に収束するまで、上述したような腰、体幹、下肢の運動パターンの近似解の算出と修正を繰り返し実行することにより、腰部並びに上肢運動パターンの厳密解、並びに、安定歩行を実現できる全身運動パターンを得ることができる。

【0125】すなわち、図7及び図8に示した処理ルーチンによれば、脚式作業時に印加されるロール、ピッチ、ヨー各軸回りのモーメントの影響をキャンセルしながら機体を安定且つ正確に正確に駆動することができる。脚式移動ロボットのための全身運動パターンを生成することができる。また、相互に干渉しているロール、ピッチ、ヨーの各軸回りの運動を安定に算出することができる。

【0126】また、図7及び図8に示した処理ルーチンによれば、ZMP上のヨー軸モーメントがほぼゼロとなるヨー軸回りに極めて滑りにくい運動を前以って生成するため、機体はヨー軸回りにはほとんど滑らない。特に、動きそのものが重要なエンターテインメント用途のロボットには、なくてはならない技術である。なお、ロボットにヨー軸回りのモーメントが印加された場合には、ピッチ軸、ロール軸、ヨー軸の3面の運動を同時に解くため、ヨー軸回りのモーメントを打ち消すための動作によって、ピッチ軸、ロール軸回りのモーメントを発生させることもない。

【0127】また、図7及び図8に示した処理ルーチンにおいて、ステップS21において得られたヨー軸モーメントを補償する上肢運動とは、人間の場合における同腕の振りや腰の回転を利用した運動によって実現することができる。このような上肢運動は、特に高速な歩行動作において姿勢安定性の維持に大きく寄与する他、機体の上半身の動作を表現力豊かに見せるといった演出効果がある。

【0128】ヒトやサルにおける動作上の「表現力」を考えた場合、腕や胴体のなどの上体の動きや姿勢は、作業の実現だけでなく、感情の表現という側面があり、非常に重要な意味を持つ。これが「身振り」、「手振り」と呼ばれる所以である。したがって、身振りや手振りという上半身主導の動作を活用してヨー軸モーメントを補償することにより、機体の動作表現力が豊かになり、とりわけエンターテインメント指向の高いロボットにおいては好ましい。

【0129】また、図9及び図10には、脚式移動ロボット100において安定歩行可能な腰、体幹、下肢運動を生成するための処理手順の他の例をフローチャートの形式で示している。但し、上述と同様に、図5に示した

線形・非干渉多質点近似モデルを用いてロボット100の各関節位置や動作を記述するものとする。

【0130】まず、足部(より具体的には足底)運動、足部運動から導出されるZMP軌道、体幹運動、上肢運動、腰部の姿勢や高さなど、各部の駆動・動作を実際に決定するためのパターンが設定される(ステップS31)。より具体的には、まず足部運動パターン、次いでZMP軌道、体幹運動パターン、そして上肢運動パターンを設定する。また、後述するヨー軸モーメント補償に用いる未知変数(上肢運動に関する)を、ここで設定しておく。また、腰部の運動に関しては、Z'方向のみ設定し、X'及びY'の各方向については未知とする。

【0131】次に、線形・非干渉多質点近似モデルを用いて、足部、体幹、そして上肢運動により発生する設定ZMP上でのピッチ軸回りのモーメント M_x 、並びにロール軸回りのモーメント M_z を算出する(ステップS32)。

【0132】次いで、線形・非干渉多質点近似モデルを用いて、腰部水平面内運動($r'_{x,1}$, $r'_{y,1}$)によって発生する設定ZMP上でのピッチ軸回りのモーメント M_x 、並びにロール軸回りのモーメント M_z を算出する(ステップS33)。

【0133】次いで、設定ZMP上におけるピッチ軸及びロール軸回りのモーメントに関する釣り合い式を、ロボット100(あるいはその多質点近似モデル)とともに動く運動座標系O'-X'Y'Z'上で導出する(ステップS34)。より具体的には、足部、体幹、そして上肢運動により発生するピッチ軸回りのモーメント M_x 、並びにロール軸回りのモーメント M_z を既知変数の項として右辺に、腰部質点の水平運動に関する項($r'_{x,1}$, $r'_{y,1}$)を未知変数の項として左辺にまとめ、線形・非干渉なZMP方程式(1)を導出する(同上)。

【0134】次いで、腰部水平面内運動($r'_{x,1}$, $r'_{y,1}$)をフーリエ級数展開し、次いで、設定ZMP上でのピッチ軸回りのモーメント M_x 、並びにロール軸回りのモーメント M_z の各々についてもフーリエ級数展開し、次いで、腰部水平面内軌道のフーリエ係数を算出し、さらに逆フーリエ級数展開することで(ステップS35)、腰部運動の近似解が求まる(ステップS36)。

【0135】当業界において既に周知のように、フーリエ級数展開することにより、時間軸成分を周波数成分に置き換えて演算することができる。すなわち、この場合には腰部の動きを周期的な動きとして捉えることができる。また、FFT(高速フーリエ変換)を適用することができるので、計算速度を大幅に向上させることができる。

【0136】ここで求められる近似解は、安定歩行可能な腰部運動パターンを規定する腰部の水平絶対位置の近似解($r'_{x,1}$, $r'_{y,1}$)であり、より具体的にはZMPが

目標位置に入るような腰部水平絶対位置である。但し、足部、体幹、上肢、腰部などの運動により発生するピッチ軸回りのモーメント M_{y1} 、並びにロール軸回りのモーメント M_{x1} をキャンセルしたことになるが、まだヨー軸回りのモーメント M_z がキャンセルされずに残されている。そこで、後続のステップでは、ヨー軸回りのモーメント M_z と M_{y1} をキャンセルするための上肢運動パターンの生成処理を行う。

【0137】ステップS17において、腰部運動の近似解によって生じる設定ZMPモーメント上のヨー軸モーメント（但し、腰部に発生するヨー軸モーメント） M_{y1} を、上式（2）を用いて算出する。

【0138】次に、線形・非干渉多質点近似モデルを用いて、足部運動と体幹運動によって発生する設定ZMP上でのヨー軸回りのモーメント M_z を算出する（ステップS38）。

【0139】次いで、設定ZMP上におけるヨー軸回りのモーメントに関する釣り合い式を、ロボット100（あるいはその多質点近似モデル）とともに動く運動座標系O'-X'Y'Z'上で導出する（ステップS39）。より具体的には、足部、体幹の運動により発生するヨー軸回りのモーメント M_z と腰部運動の近似解によって生じるヨー軸回りのモーメント M_{y1} を既知変数の項として右辺に、上肢関節の運動により発生するヨー軸回りのモーメント M_{y2} を未知変数の項として左辺にまとめることで、上式に示したような線形・非干渉なZMP方程式（3）を導出する。

【0140】次いで、ステップS35と同様に、ZMP方程式の周波数領域におけるフーリエ係数の比較法により（ステップS40）、上肢運動パターンを算出する（ステップS41）。上肢運動パターンの算出時には、あらかじめ与えられているヨー軸モーメント補償用の未知変数を適用する。

【0141】上式（3）において、未知変数 θ の取り方として、上肢関節のどの関節角を未知変数として利用してもよい。より具体的に言えば、図3に示した関節自由度のうち、肩関節ピッチ軸8、肩関節ロール軸9、上腕ヨー軸10、肘関節ピッチ軸11、前腕ヨー軸12、手首関節ピッチ軸13、手首関節ロール軸14のうち1以上の関節の組み合わせで上式（3）を成立させるようにしてもよい。

【0142】また、上式（3）を成立させる上で、右下肢と左上肢とが対称又は逆位相で動かすことを前提としていなくてもよい。未知変数 θ の取り方の例としては、大きなモーメントの発生量が期待できるものとして、肩関節のピッチ軸回りの関節角（ $\theta_{\text{pitch_shoulder}}$ ）を未知変数として用いることが挙げられる。あるいは、より人間の生体メカニズムに近いモーメント発生動作を期待できるものとしては、肩関節のピッチ軸回りの関節角（ $\theta_{\text{pitch_shoulder}}$ ）を未知変数にし、さらに肘関節角（ $\theta_{\text{pitch_elbow}}$ ）を（ $\theta_{\text{pitch_elbow}} = G \times \theta_{\text{pitch_shoulder}}$ ；Gはゲイン）とすることで、未知変数を1つにしたままで（すなわち計算量を変えずに）肩関節と肘関節の協調動作によるヨー軸補償運動パターンの算出を行うことができる。

【0143】勿論、ロボット100の上体の一部である体幹ヨー軸7を利用して上式（3）を成立させることも、理論上は可能であるが、可動角が広い肩関節や肘関節などの上肢の駆動を用いて上式（3）を成立させる方が機体での実現が容易であり、且つ、高精度な制御が可能となる。

【0144】上記のステップS21までで算出された近似解上ではあらかじめ設定した体幹・上肢運動が実現できない場合には、体幹・上肢運動パターンの再設定・修正を行う（ステップS42）。この際、腰部の軌道を算出してもよい。

【0145】次いで、上述のようにして得られた全身運動パターンを代入して、厳密モデル（すなわち、剛体、若しくは非常に多くの質点からなる剛体移動ロボット100の精密なモデル）における設定ZMP上におけるロール軸、ピッチ軸、及びヨー軸の各軸回りのモーメント（ eM_{x1} 、 eM_{y1} 、 eM_{z1} ）を算出する（ステップS43）。非厳密モデルでは上記の【数3】が成立することを前提としたが、厳密モデルにおいてはかかる前提を要しない（すなわち時間の変化に対して一定である必要はない）。

【0146】厳密モデルにおけるモーメント（ eM_{x1} 、 eM_{y1} 、 eM_{z1} ）は、腰部運動においてロール、ピッチ、ヨーそれぞれの軸回りに発生するモーメント誤差である。続くステップS44では、これら各軸回りのモーメント（ eM_{x1} 、 eM_{y1} 、 eM_{z1} ）が許容値（ εM_{x1} 、 εM_{y1} 、 εM_{z1} ）未満か否かを判定する。許容値 ε 未満であれば、ロボット100の機体上の腰、体幹、下肢の各部における安定運動パターンの厳密解、並びにロボットの機体のヨー軸回りに発生するモーメントをキャンセルしたロボット100の全身運動パターンを得ることができたことを意味するので（ステップS45）、本処理ルーチン全体を終了する。

【0147】他方、厳密モデルにおけるモーメント（ eM_{x1} 、 eM_{y1} 、 eM_{z1} ）が許容値（ εM_{x1} 、 εM_{y1} 、 εM_{z1} ）以上であった場合には、厳密モデルにおけるロール軸並びにピッチ軸回りのモーメント（ eM_{x1} 、 eM_{y1} ）を用いて近似モデルにおけるロール軸並びにピッチ軸回りのモーメント（ M_{x1} 、 M_{y1} ）を修正して（ステップS47）、再びZMP方程式の導出を行う。あるいは、厳密モデルにおけるヨー軸回りのモーメント既知発生モーメント eM_{z1} を用いて近似モデルにおけるヨー軸回りの既知発生モーメント M_{z1} を修正して（ステップS46）、再びZMP方程式の導出を行う。そして、許容値 ε 未満に収束するまで、上述したような腰、体幹、下肢の運動パター

ンの近似解の算出と修正を繰り返し実行することにより、腰部並びに上肢運動パターンの厳密解、並びに、安定歩行を実現できる全身運動パターンを得ることができる。

【0148】すなわち、図9及び図10に示した処理ルーチンによれば、脚式作業時に印加されるロール、ピッチ、ヨー各軸回りのモーメントの影響をキャンセルしながら機体を安定且つ正確に正確に駆動することができる。足式移動ロボットのための全身運動パターンを生成することができる。また、相互に干渉しているロール、

ピッチ、ヨーの各軸回りの運動を安定に算出することができる。【0149】また、図9及び図10に示した処理ルーチンによれば、ZMP上のヨー軸モーメントがほぼゼロとなるヨー軸回りに極めて滑りにくい運動を前以って生成するため、機体はヨー軸回りにはほとんど滑らない。特に、動きそのものが重要なエンターテインメント用途のロボットには、なくてはならない技術である。なお、ロボットにヨー軸回りのモーメントが印加された場合には、ピッチ軸、ロール軸、ヨー軸の3面の運動を同時に解くため、ヨー軸回りのモーメントを打ち消すための動作によって、ピッチ軸、ロール軸回りのモーメントを発生させることもない。

【0150】また、図9及び図10に示した処理ルーチンにおいて、ステップS41において得られたヨー軸モーメントを補償する上肢運動とは、人間の場合における両腕の振りや腰の回転を利用した運動によって実現することができる。このような上肢運動は、特に高遠な歩行動作において姿勢安定性の維持に大きく寄与する他、機体の上半身の動作を表現力豊かに見せるといった演出効果がある。

【0151】ヒトやサルにおける動作上の「表現力」を考えた場合、腕や胴体のなどの上体の動きや姿勢は、作業の実現だけでなく、感情の表現という側面があり、非常に重要な意味を持つ。これが「身振り」、「手振り」と呼ばれる所以である。したがって、身振りや手振りという上半身主導の動作を活用してヨー軸モーメントを補償することにより、機体の動作表現力が豊かになり、とりわけエンターテインメント指向の高いロボットにおいては好ましい。

【0152】【追補】以上、特定の実施形態を参照しながら、本発明について詳解してきた。しかしながら、本発明の要旨を逸脱しない範囲で当業者が該実施形態の修正や代用を成し得ることは自明である。

【0153】また、本発明の要旨は、必ずしも「ロボット」と称される製品には限定されない。すなわち、電気的若しくは磁気的な作用を用いて人間の動作に似せた運動を行う機械装置であるならば、例えば玩具などのような他の産業分野に属する製品であっても、同様に本発明を適用することができる。

【0154】要するに、例示という形態で本発明を開示してきたのであり、本明細書の記載内容を限定的に解釈するべきではない。本発明の要旨を判断するためには、冒頭に記載した特許請求の範囲の網を参照すべきである。

【0155】

【発明の効果】以上詳記したように、本発明によれば、高遠歩行などの脚式作業を安定且つ正確に実現することができる、脚式移動型ロボットのための優れた動作制御装置及び動作制御方法、並びにロボット装置を提供することができる。

【0156】また、本発明によれば、上肢の運動を用いて機体のヨー軸回りに印加されるモーメントを低減することができる。脚式移動型ロボットのための優れた動作制御装置及び動作制御方法、並びにロボット装置を提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の実施に供される脚式移動ロボット100を前方から眺望した様子を示した図である。

【図2】本発明の実施に供される脚式移動ロボット100を後方から眺望した様子を示した図である。

【図3】本実施例に係る脚式移動ロボット100が具備する自由度構成モデルを模式的に示した図である。

【図4】本実施例に係る脚式移動ロボット100の制御システム構成を模式的に示した図である。

【図5】本実施例に係る歩行制御の計算のために導入される、脚式移動ロボット100の線形且つ非干渉の多質点近似モデルを示した図である。

【図6】図5に示した多質点モデルの腰部周辺の拡大図である。

【図7】脚式移動ロボット100において安定歩行可能な腰、体幹、下肢運動を生成するための処理手順の一例を示したフローチャートである。

【図8】脚式移動ロボット100において安定歩行可能な腰、体幹、下肢運動を生成するための処理手順の一例を示したフローチャートである。

【図9】脚式移動ロボット100において安定歩行可能な腰、体幹、下肢運動を生成するための処理手順の他の例を示したフローチャートである。

【図10】脚式移動ロボット100において安定歩行可能な腰、体幹、下肢運動を生成するための処理手順の他の例を示したフローチャートである。

【図11】2足脚式移動ロボットの歩行速度[秒/歩]とヨー軸方向に発生するモーメントNmとの関係(例)を表した図である。

【符号の説明】

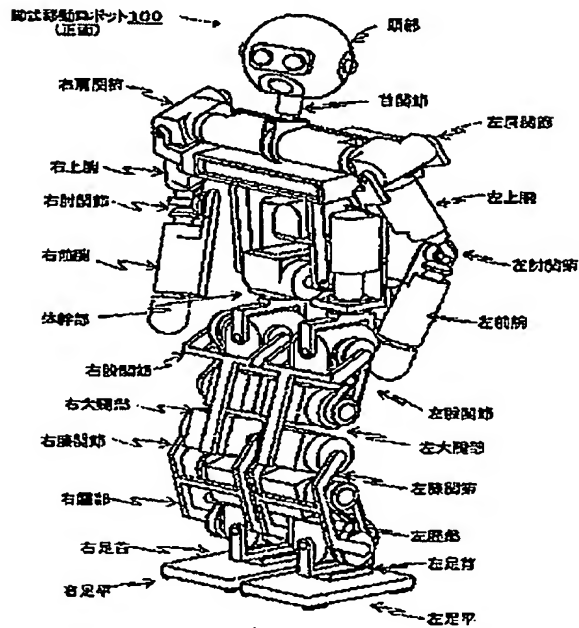
- 1…頭部、2…首関節ヨー軸
- 3…首関節ピッチ軸、4…首関節ロール軸
- 5…体幹ピッチ軸、6…体幹ロール軸
- 7…体幹ヨー軸、8…肩関節ピッチ軸

33

9…肩関節ロール軸, 10…上腕ヨー軸
 11…肘関節ピッチ軸, 12…前腕ヨー軸
 13…手首関節ピッチ軸, 14…手首関節ロール軸
 15…手部, 16…股関節ヨー軸
 17…股関節ピッチ軸, 18…股関節ロール軸
 19…膝関節ピッチ軸, 20…足首関節ピッチ軸
 21…足首関節ロール軸, 22…足部
 30…頭部ユニット, 40…体幹部ユニット
 50…腕部ユニット, 51…上腕ユニット

*

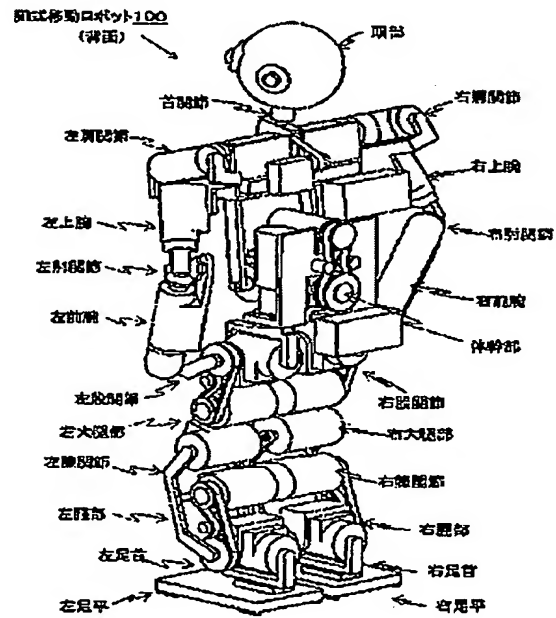
【図1】



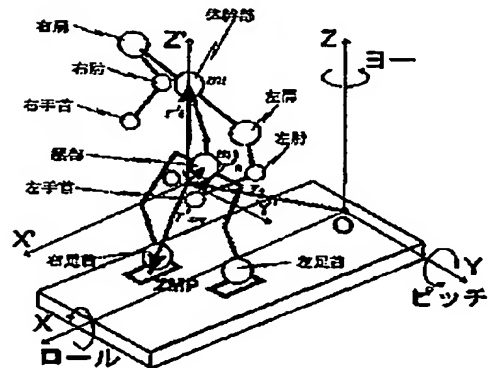
34

* 52…肘関節ユニット, 53…前腕ユニット
 60…脚部ユニット, 61…大腿部ユニット
 62…膝関節ユニット, 63…脛部ユニット
 80…制御ユニット, 81…主制御部
 82…周辺回路
 91, 92…接地確認センサ
 93…姿勢センサ
 100…脚式移動ロボット

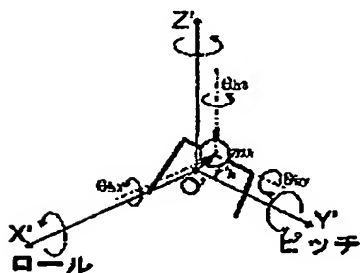
【図2】



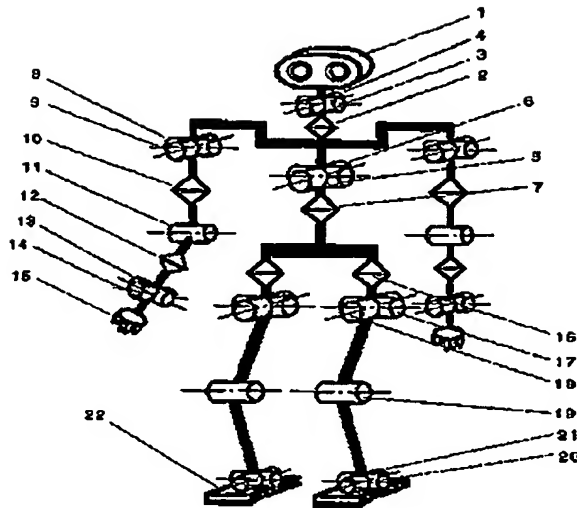
【図5】



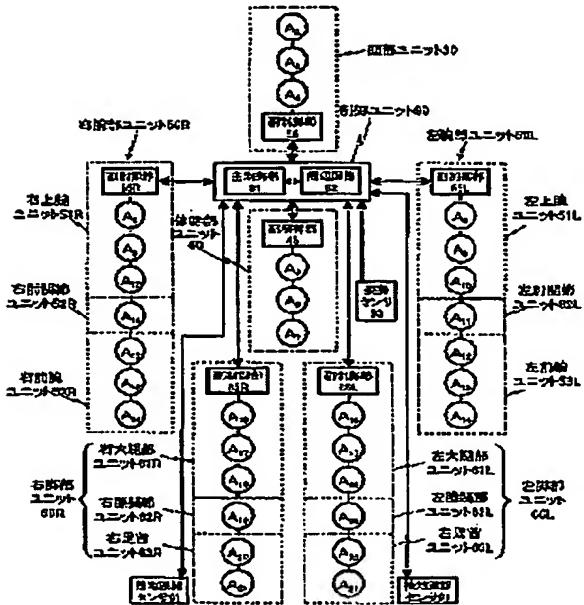
【図6】



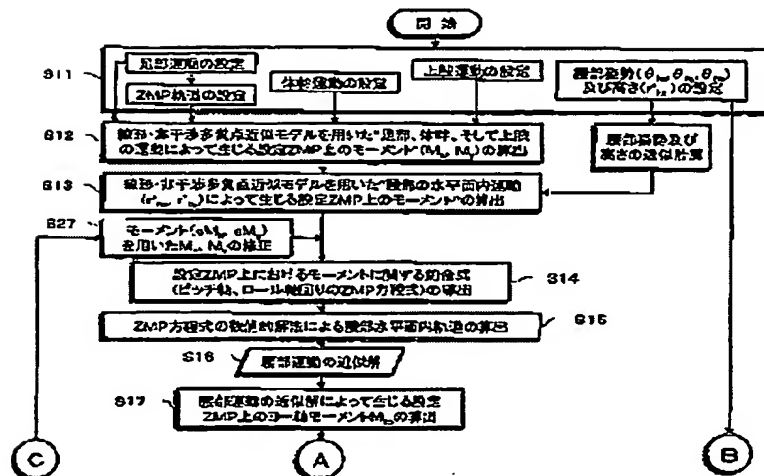
【図3】



【図4】



【図7】



```

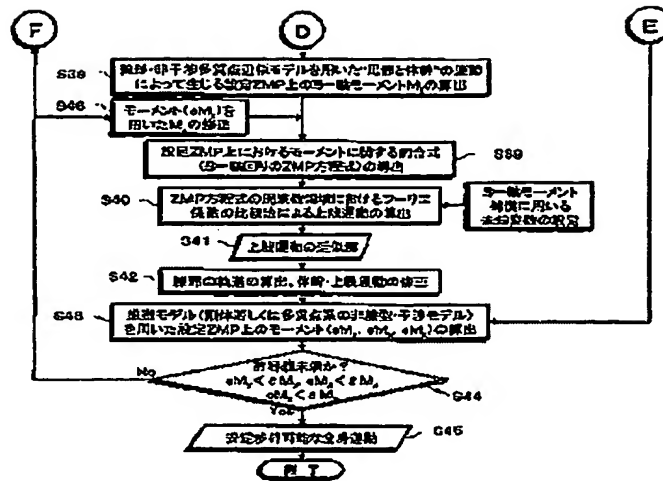
    graph TD
      C((C)) --> S19[819 幹形・肘下歩多変量近似モデルを用いた足部と体幹の運動  
によって出る歩多ZMP上のモーメントMの算出]
      S19 --> S20[820 ZMP方程式の数値的解法による上肢運動の算出]
      S20 --> S21[821 上肢運動の図解用]
      S21 --> S22[822 離脱の軌道の算出、停止・上肢運動の修正]
      S22 --> S23[823 重心モデル(両脚付くは多変量系の非線型・半モデル)  
を用いた決定ZMP上のモーメント(mM、eM、eM)の算出]
      S23 --> S24{824 許容値未満か?  
eM < eM、eM < eM、  
eM < eM}
      S24 -- No --> S19
      S24 -- Yes --> S25[825 安定歩行可能な全身運動]
      S25 --> End((終了))
  
```

```

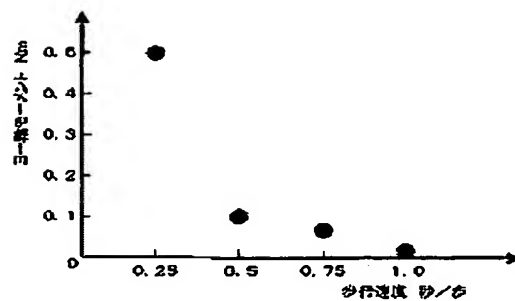
graph TD
    Start([開始]) --> S631
    subgraph S631 [631]
        A[足部運動の検出] --> B[ZMP軌道の検出]
        C[体幹運動の検出] --> D[上肢運動の検出]
        E[姿勢変換  $(\theta_{tr}, \theta_{tr})$  及び姿勢  $(r_{tr})$  の設定]
    end
    B --> S632
    C --> S632
    D --> S632
    E --> S632
    subgraph S632 [632]
        F[輪形・非平多面体近似モデルを用いた足部、体幹、そして上肢の運動によって生じる設定ZMP上のモーメント  $(M_x, M_y)$  の算出]
        G[腰部姿勢及び高さの近似]
    end
    F --> S633
    G --> S633
    subgraph S633 [633]
        H[輪形・非平多面体近似モデルを用いた腰部の水平面内運動  $(r_{tr}, r_{tr})$  によって生じる位置ZMP上のモーメントの算出]
    end
    H --> S634
    subgraph S634 [634]
        I[モーメント  $(mM_x, mM_y)$  を用いた  $M_x, M_y$  の修正]
    end
    I --> S635
    subgraph S635 [635]
        J[設定ZMP上におけるモーメントに関する釣合式(ピッチ点、ロール毎回りのZMP方程式)の導出]
    end
    J --> S636
    subgraph S636 [636]
        K[ZMP方程式の同次数領域におけるフーリエ級数の比較法による腰部水平面内軌道の算出]
    end
    K --> S637
    subgraph S637 [637]
        L[腰部運動の近似解]
    end
    L --> S638
    subgraph S638 [638]
        M[腰部運動の近似解によって生じる設定ZMP上の二輪モード  $N_{tr}$  の算出]
    end
    M --> End([終了])
    S631 --> F
    S638 --> D
    S638 --> E

```

【図10】



【図11】



フロントページの続き

(72)発明者 石田 健蔵
東京都品川区北品川6丁目7番35号 ソニ
ー株式会社内

(72)発明者 山口 仁一
東京都日野市多摩平5-14-38
Fターム(参考) 3C007 AS36 CS08 WA03 WA13 WB06
WB07